Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 16, No. 1 pp. 50-55, 2015

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.1.50
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

캐비테이션 억제를 위한 감압밸브의 유로 형상에 관한 연구

박우철[1*], 김일겸[2]
[1]강원대학교 자동차공학과, [2]첨단기공(주) 부설연구소

Study of the geometry of the flow path of a Pressure Reducing Valve to Suppress the Cavitations

Woo-Cheul Park[1*], Il-Gyum Kim[2]
[1]**Dept. of Vehicle Eng., Kangwon National University**
[2]**ChomDan Mechanical Co. Ltd., R&D Center**

요 약 본 연구에서는 공동 주택의 수전 개방 조건에서, 감압밸브 내부 오리피스 형상이 캐비테이션 발생에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 이를 위하여 감압밸브 내부의 유로형상을 9가지 유형으로 구별하여 제시하고, 3차원 유한해석 코드인 ANSYS CFX를 사용하여 감압밸브 내의 유동해석을 수행하였다. 급격한 단면 변화가 일어나는 오리피스에서 최저 압력과 최대 속도가 발생하였다. 최대속도가 존재하는 부위에서 0 이상 증기체적비를 나타내어 캐비테이션이 발생함을 확인하였다. 유로 길이가 긴 형상에 비하여 돌연 확대관 형상의 모델에서 유체의 최대 속도가 낮게 나타났다. 돌연확대관 형상의 경우에는 매우 작은 증기체적비를 나타내고 있으며, 돌연확대의 정도가 클수록 증기체적비는 낮게 나타났다. 따라서 감압밸브의 케비테이션 발생을 방지하기 위해서는 돌연확대의 형상을 갖도록 설계하는 것이 타당하다고 판단된다.

Abstract This study examined the relationship between the shape of the inside of the PRV and the cavitation of the water supply system of an apartment house. In this paper, nine types of PRV with different gaps and shapes were analyzed numerically using a 3D model embedded in the commercial code, ANSYS-CFX. The lowest pressure and the maximum velocity occurred at the narrow gap, which is located at the between the stem and the disk. When the gap size was increased, the vapor volume fraction was always greater than 0, but the vapor volume fraction of the type of expansion pipe approached 0. These results indicate that the cavitation of PRV can be reduced by a shape change to the type of expansion pipe.

Key Words : Cavitation, Pressure Reducing Valve(PRV), Valve coefficient, Vapor volume fraction

1. 서론

최근 몇 년간 대규모 아파트 단지와 초 고층화된 빌딩의 급수 시스템이 고가수조방식에서 가압급수방식으로 변화하는 추세이다. 고가수조방식은 건물 옥상에 물탱크를 설치하여 중력에 의한 급수방식으로 일부 상층부에서 압력부족현상, 옥상 물탱크의 수질오염문제, 건설원가 상승과 비효율적인 건축 공간 활용, 유지관리 불편과 동파 누수사고 등의 단점이 있다. 가압급수방식은 지하저수조로부터 급수 사용처까지 직접 일정한 압력으로 공급하는 부스터 펌프 시스템으로써 여러 대의 부스터 펌프를 대수 제어하여 급수사용량에 따라 일정한 압력을 안정적으로 사용처에 공급하는 방식이다[1]. 부스터 펌프방식을 사용하는 경우에는 손실과 층간의 압력 차이를 해소하기 위하여 고압으로 송출한 후 감압밸브를 사용하여 각 세대별 공급하는 압력을 균등하게 조절하는 방식을 사용하

본 논문은 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-220140045)
*Corresponding Author : Wool-Cheul Park(Kangwon National Univ.)
Tel: +82-33-570-6392 email: wchpark@kangwon.ac.kr
Received August 11, 2014 Revised October 10, 2014 Accepted January 8, 2015

고 있다. 감압밸브를 사용하는 경우, 부스터 펌프의 공급 압력에 해당되는 입구측의 압력과 사용 유량과 연관된 출구측 압력의 차이가 지나치게 클 경우에는 캐비테이션 현상이 발생할 가능성이 높다. 캐비테이션 현상은 감압밸브의 파손 및 성능 저하, 그리고 소음의 원인이 된다. 감압밸브는 거주공간과 직접적으로 접하는 장소에 설치되므로 감압밸브에서의 캐비테이션 발생은 삶의 질과 직결된 소음문제를 발생시킨다[2,3].

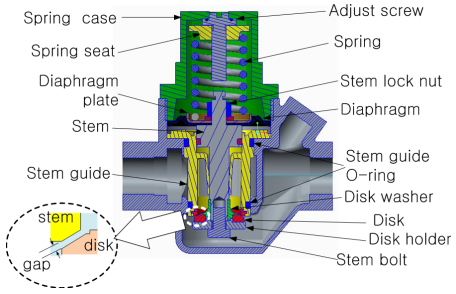
감압밸브의 내부 구조는 제조회사 및 사용용도에 따라 다양한 형태로 설계되지만, 내부 형상이 캐비테이션 현상에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 전무할 뿐만 아니라 공개된 사례는 많지 않다. 감압밸브의 구조적 특성으로 인해 정압 측정을 제외한 내부 유동장의 실험적 측정이 거의 불가능하므로 수치해석의 중요성이 매우 높다고 할 수 있다[4].

이에 본 연구는 실제 공동 주택의 수전 개방 조건에서, 감압밸브 내부의 오리피스 형상이 캐비테이션 발생에 미치는 영향에 대하여 살펴보고자 한다. 이를 위하여 감압밸브 내부의 유로형상을 9가지 유형으로 구별하여 제시하고, 이를 3D 모델링에 의하여 설계를 하고, 3차원 유한해석 코드인 ANSYS CFX를 사용하여 감압밸브 내의 유동해석을 수행하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 공동주택에서 사용하는 single seat direct 방식의 감압밸브에 대하여 전산 유동해석을 수행하였다. Fig. 1은 Pro Engineering WildFire4를 이용한 감압밸브의 3D 모형이다.



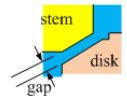
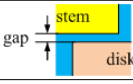
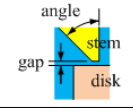
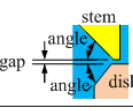
[Fig. 1] Components and the internal structure of a single seat direct type PRV.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 감압밸브의 내부구조는 단순하지만, 많은 부품들로 구성되어 있다.

작은 원 안에 도시된 바와 같이 스템(stem)과 디스크(disk) 사이에 형성되는 간극을 통하여 유동이 이루어진다. 그림에 나타난 바와 같이 스템과 디스크 사이는 유체통과 단면의 변화가 급격하게 이루어지는 부분이므로, 이 부위에서 유체의 거동에는 매우 큰 변화가 있을 것으로 예측된다. 그러므로 이 부위의 형상을 설계하는 것이 감압밸브 설계에 있어서 가장 중요한 문제라 할 수 있을 것이다.

캐비테이션 현상에 대하여 오리피스 간극의 크기와 간극의 형상이 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Table 1과 같이 9가지 유형의 형상을 설정하였다.

[Table 1] Orifice geometry of PRV for analysis.

Type		feature	shapes of orifice
gap change	Type A	0.3mm	
	Type B	0.6mm	
	Type C	0.9mm	
	Type D	1.2mm	
shape change	Type E	flat gap 0.3mm	
	Type F	45°-flate gap 0.3mm	
	Type G	30°-Flate gap 0.3mm	
	Type H	45°-45° gap 0.3mm	
	Type I	30°-30° gap 0.3mm	

ANSYS CFX에서 사용하기 위한 유동모델을 Fig. 2에 나타내었다. 밸브 입구와 출구에서의 역류 현상을 방지하기 위하여 그림과 같이 입구와 출구에 각각 80mm, 100mm의 유동영역을 추가하였다.

2.2 지배 방정식 및 경계조건

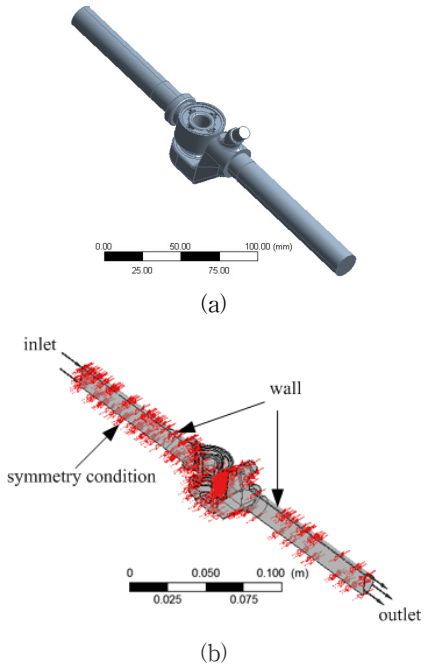
연속방정식과 운동량 방정식, 즉, Navier -Stokes 방정식의 풀이를 통해 유로 내부의 유동장을 모사하였다. 지배방정식은 다음과 같다[5].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_j}+\frac{\partial(\rho \tau_{ij})}{\partial x_j} \qquad (2)$$

본 연구에서는 형상의 대칭성을 이용하여 전체 유동장의 중심면에 대칭조건을 주어 유동장의 절반만을 계산영역으로 설정하였다.

해석에 사용된 작동 유체는 물이며, ANSYS CFX 라이브러리의 25℃ 액상과 기상의 값들을 사용하였다[6].



[Fig. 2] 3D model and boundary conditions for flow analysis.
(a) 3D model (b) boundary conditions

본 연구에서는 대류항에 대한 차분법으로 2차 High resolution scheme을 사용하였고, 지배방정식에 포함된 레이놀즈 응력항 계산을 위한 난류모델로 SST(Shear Stress Transportation)모델을 사용하였다. SST 모델은 감압밸브 내부 유동과 같이 계산 영역 내의 매우 작은 구간에서 변화가 큰 유동현상이 일어나는 상황에서 경계층과 경계층 밖의 유동현상을 잘 모사할 수 있다[7,8].

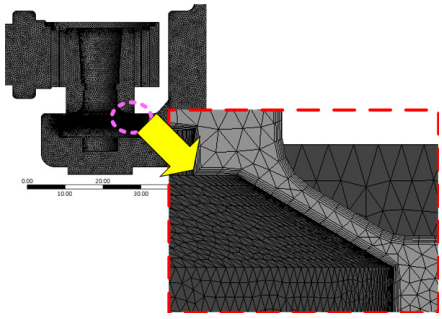
다상(multiphase) 모델로 동질 다상유동(homogeneous multiphase flow)모델을 사용하였으며, 캐비테이션 모델은 Rayleigh-Plesset Model을 사용하였다. 물의 포화압력은 3574Pa의 고정값을 사용하였다. 그 이외의 Rayleigh -Plesset 모델에 사용되는 파라미터들은 CFX에서 제공하는 기본값을 사용하였다[6]. 또한, 수렴 조건으로서 각 셀에 대한 질량보존방정식의 잉여값(residual)은 rms값으로 10^{-7}, 운동량과 연속성 등 그 밖의 방정식의 잉여값은 10^{-5}의 조건을 부여하였다.

입구 경계조건은 고층 아파트의 세대별 급수압력인 7kg/cm^2 (686kPa, 게이지 압력)의 압력 조건과 25℃의 온도 조건을 주었고, 출구경계 조건은 일정압력 조건인 2.5kg/cm^2(245kPa, 게이지 압력)을 주었다. 모든 벽면에는 점착조건(no-slip)과 단열조건을 적용하였다.

2.3 계산 격자

Fig. 3은 유동 해석 방법의 결정과 난류 모델 설정 및 해석결과의 타당성을 검증하기 위한 Type A 형상의 계산 격자점을 나타낸 것이다. 격자계는 Tetra/Prism 격자로 구성하였으며, 벽 근처 속도 구배의 정확한 해석을 위해 벽 근체 격자는 육면체로 구성하였다.

감압밸브는 오리피스의 작은 구간에서 유동변화가 크게 일어나며, 해석에 사용된 모델들의 오리피스 형상이 각각 다르기 때문에 일률적인 격자의 크기를 적용할 수 없다. 따라서 해석의 정확도와 계산 시간의 단축을 고려하여 격자의 최소 크기는 0.002mm~0.003mm 사이로 하였으며, 메쉬 skewness의 최대값이 0.85이하가 되도록 격자 면과 격자의 최대 크기를 정하였다.

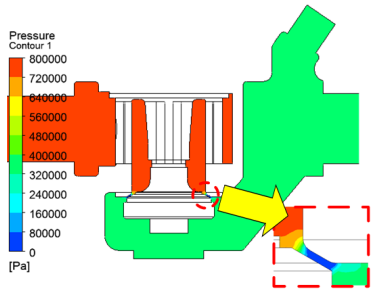


[Fig. 3] Generated mesh model

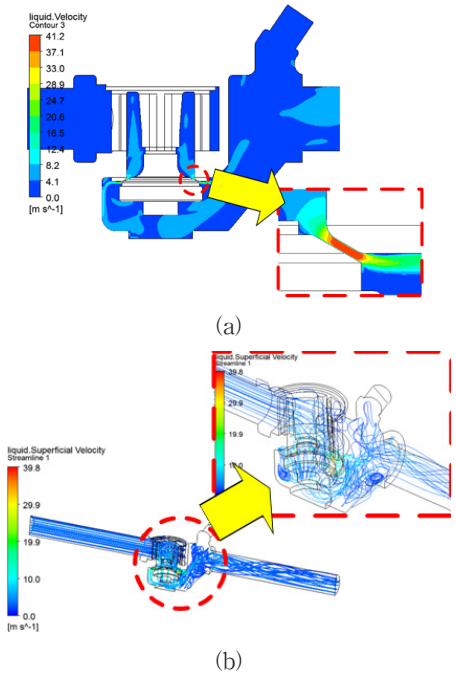
3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 Type A의 대칭면에서의 압력분포를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 입구측은 급수압력에 가까운 800kPa 정도의 높은 압력 분포를 나타내고 있으며, 출구측의 압력도 사용 압력인 320kPa 이상의 압력 분포를 나타내고 있다. 그러나 오리피스 역할을 하는 스템과 디스크 사이의 간극 부분에서 가장 큰 압력 강하가 이

루어져, 대기압보다 낮은 압력이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 대기압보다 낮은 압력 분포로 인하여 캐비테이션 현상이 일어날 것으로 예측할 수 있다.



[Fig. 4] Contour of pressure

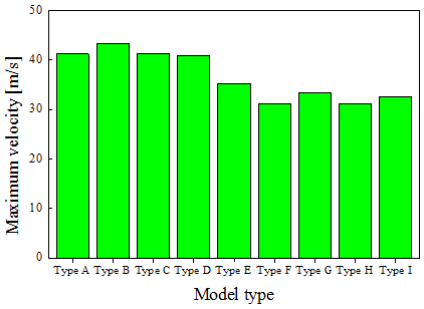


[Fig. 5] Velocity distribution and stream lines on the inside of the PRV.
(a)velocity distribution, (b) stream lines

Fig. 5는 Type A의 밸브 대칭면에서의 속도 분포와 유선을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 감압밸브의 입구측 및 출구측의 속도는 빠르게 형성되지는 않지만, 압력분포가 매우 낮게 형성되는 디스크와 스템 가이드 사이의 유로에서는 37.8m/s의 최대속도가 형성됨을 알 수 있다. 좁은 유로를 제외한 대부분의 영역에서는 10[m/s] 이하의 속도 분포를 보이고 있다.

Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 스템 가이드의 형상에 의해 유선의 변화가 복잡하게 나타나고 있으며, 디스크와 스템 가이드 사이의 유로를 통과한 후 확장되는 영역에서 유선의 변화가 복잡하게 나타나고 있다, 그러나 유체의 입구측과 출구측으로의 역류는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

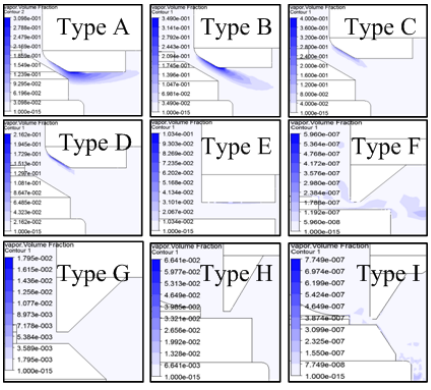
Fig. 6은 감압밸브 내부의 최대 유속을 나타낸 것이다. 유로가 길게 형성되는 유형인 Type A, Type B, Type C, Type D에서는 40[m/s]이상의 높은 속도값을 나타내지만, 돌연 확대관 형태를 갖는 Type F, Type G, Type H, Type I에서는 이 보다 낮는 30~35[m/s]의 속도값을 나타내고 있다.이러한 현상은 유로의 길이가 길어질 경우 jet 현상이 발생하여 유속이 증가하는 것으로 생각된다. 스템과 디스크 사이의 유로가 90°로 형성되어 있는 Type E 경우에도 돌연 확대 형상의 유형들보다 빠른 유속을 나타내고 있다. 한쪽에만 돌연확대 경사각을 갖는 Type F와 Type H가 약 31[m/s]의 가장 낮은 유속을 나타나고 있다.



[Fig. 6] Maximum Velocities.

Fig. 7은 압력강하가 가장 크게 일어나며, 유속이 가장 빠른 구간인 스템과 디스크 부위에 대하여 9가지 유형의 감압밸브 내부의 증기 체적비(vapor volume fraction)을 나타낸 것이다. 유로가 길게 형성되는 Type A, Type B, Type C, Type D에서는 간극의 크기가 변하더라도 디스크와 스템 사이의 오리피스 영역에서 증기체적비는 0 이상의 값을 나타내고 있으며, 이 영역을 제외한 대부분의 영역에서는 0의 증기 체적비를 나타내고 있다. 유로가 길게 평행하게 형성되는 Type E에서도 매우 작은 분포이지만, 약 0.1 정도의 증기 체적비를 나타내고 있다. 그러나 유로의 길이가 짧고, 단면이 급격하게 확대되는 형상

인 Type F, Type H, Type I, Type G에서는 매우 낮은 증기체적비를 나타내고 있다. 특히 급격한 확산형 구조를 갖는 Type G에서는 거의 0에 가까운 증기 체적비를 나타내고 있다.

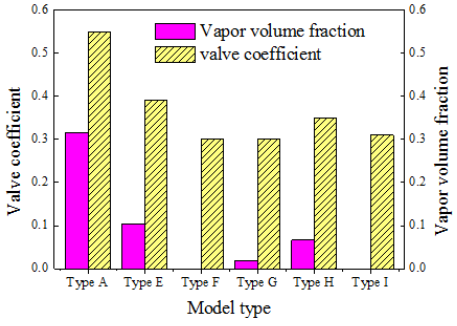


[Fig. 7] Contour of the vapor volume fraction

Fig. 8는 밸브 유량 계수와 증기 체적비를 나타낸 것이다. 간극이 크기가 다른 경우는 비교하는 것이 의미가 없어 동일한 간극의 크기를 갖는 경우만을 비교하였다. 밸브 유량 계수 K_v는 밸브의 차압이 1bar일 때 5~30℃의 물이 통과하는 유량을 [m^3/h]로 표시한 것으로 밸브를 선정할 때 사용되며, 다음의 공식으로 구한다[8].

$$K_v = Q\sqrt{\frac{G}{\Delta P}} \tag{3}$$

여기서 Q는 입구측 유량[m^3/h], ΔP는 입구와 출구의 압력차[kgf/cm^2]이며, G는 액체의 비중이다.



[Fig. 8] Mass flow at outlet(gap size 0.3mm)

Fig. 8에 나타난 바와 같이 앞서 살펴본 Fig.6의 형상에 따른 최대 유속의 경향과는 다른 경향을 나타내고 있다. 최대 유속이 낮은 Type H형 경사각을 갖는 다른 유형에 비하여 밸브 유량계수의 값과 증기체적비가 크게 나타나고 있다. Type F와 Type I에서는 증기 체적비가 거의 나타나지 않고 있어 이 유형에서는 캐비테이션 현상이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

4. 결론

실제 공동 주택의 수전 개방 조건에서 감압밸브 내부의 형상에 따른 캐비테이션 현상과의 관계를 살펴보았다. 이를 위하여 9가지 형상의 유형을 제시하고, 3차원 유한해석 코드인 ANSYS -CFX를 사용하여 감압밸브 내의 유동해석을 수행하였다. 수치해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 급격한 단면 변화가 일어나는 스템과 디스크 사이의 오리피스 영역에서 매우 큰 압력강하와 최대 속도가 존재함을 확인하였다.
2. 최대속도가 존재하는 부위에 증기 체적비의 값이 0 이상의 값을 나타내어 캐비테이션이 발생함을 확인하였다.
3. 유로의 길이가 길게 형성되는 형상에 비하여 돌연확대관 유형의 형상에서 유속의 최고 속도가 낮게 나타났다.
4. 간극 크기의 증가는 캐비테이션 감소에 영향을 미치지 않으며, 돌연 확대관 형태의 경우에는 매우 작은 증기체적비를 나타내어 캐비테이션을 감소시킬 수 있음을 확인하였으며, 확대 정도가 클수록 증기 체적비는 작게 나타났다.

따라서 감압밸브의 케비테이션 발생을 방지하기 위해서는 돌연확대의 형상을 갖도록 설계하는 것이 타당하다고 판단된다. 향후 본 연구 결과를 적용한 밸브에 대한 실험을 병행한 연구가 수행되어져야 할 것이다.

References

[1] Y. J. Na, I. H. Yang, "Comparison between Gravity Tank and Booster Pump System in Apartment Buildings using

Life Cycle Cost Analysis", J. of the Society of Living Environment System, Korea, Vol. 15, No. 2, pp.165~171, Jun. 2008

[2] T. J. Kim, D. J. Kim, "Influence of Pressure Reducing Valves on Flow Characteristics of the Water Supply System for an Apartment Complex", J. of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 12, No. 6, pp.23~28, Dec. 2012

[3] J. H. Park, K. N. Rhee, M. C. Cha, M. S. Yeo, K. W. Kim, "A Study on the Prevention of Cavitation for Pressure Reducing Valves in Residential Buildings", Proc. KIAEBSE Spring Annual Conference, pp.260~264, March, 2010

[4] W. C. Park, J. K. Lee, I. G. Kim, Y. S. Park, "Study on Vibration Induced by Fluid at a Water Pressure Reducing Valve through Structure-Fluid Coupled Analysis ", J. of Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 10, pp.4371~4377 Oct. 2012
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.10.4371

[5] A. Alexandrou, 2002, Principles of Fluid Mechanics, Prentice-Hall, New Jersey.

[6] ANSYS Inc, 2013. 11, ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, Release 15.0, Southpointe.

[7] W. Vieser, T. Esch, F. Menter, "Heat Trasfer Preditions using Advanced Two-Equaion Turbulence Models", CFX, c2002[cited Nov. 06. 2002], http://www.software.aeat.com/cfx/(accessed Dec. 10, 2013)

[8] Spirax-Sarco Limited, "Sizing valves for water services" Spirax-Sarco Limited, http:// www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/control-hardware-el-pn-actuation/control-valve-sizing-for-water-systems.asp (accessed May, 08, 2014)

박 우 철(Woo-Cheul Park) **[정회원]**

- 1987년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공석사)
- 1997년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 자동차공학과 교수

<관심분야>
지능형 구조물, 시스템설계, 진동 및 소음제어, 친환경 기계설비

김 일 겸(Il-Gyoum Kim) **[정회원]**

- 1988년 2월 : 인하대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공석사)
- 2000년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 2010년 10월 : 강남필터(주) 부설연구소 소장
- 2012년 1월 ~ 현재 : 첨단기공(주) 부설연구소 소장

<관심분야>
열유체 시스템설계, 공기질 관련 설비, 산업기계설비, CFD